

Grid-connected Distributed Generation
and Voltage Stability

分布式发电并网与 电压稳定性

赵兴勇 等 著

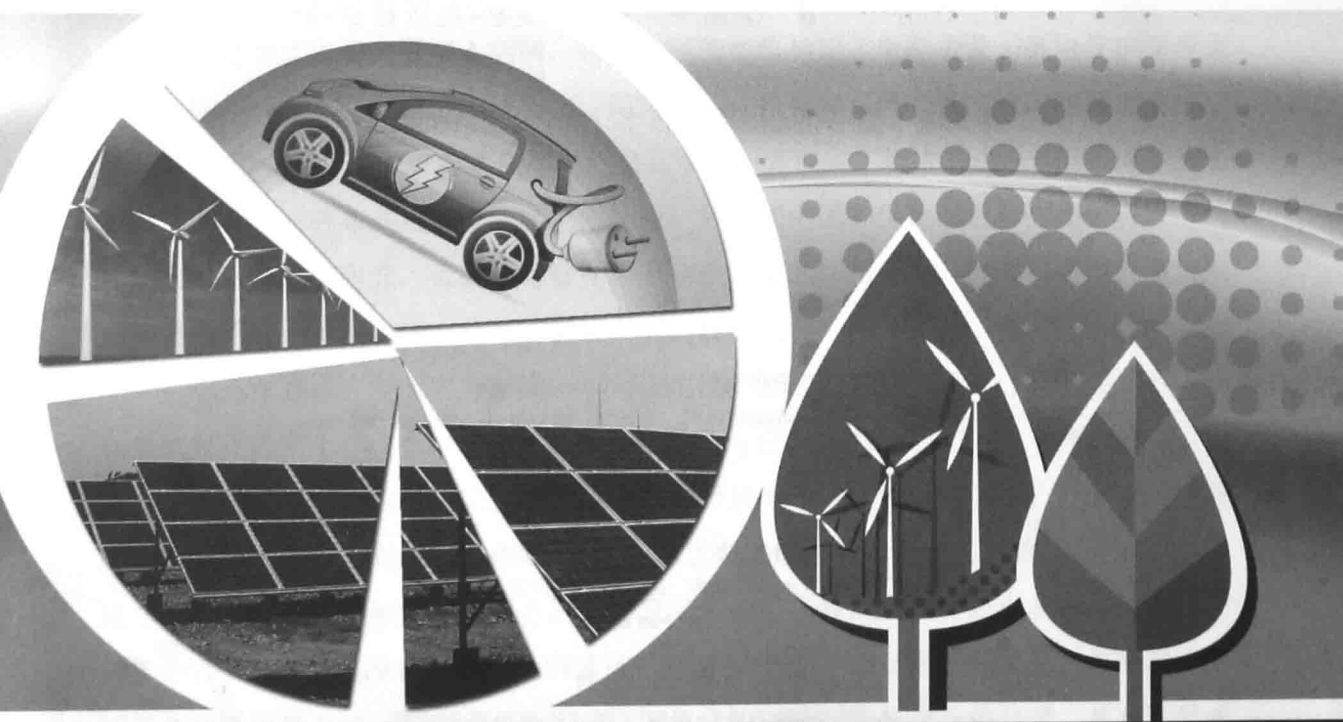


中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Grid-connected Distributed Generation
and Voltage Stability

分布式发电并网与 电压稳定性

赵兴勇 王秀丽 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书根据分布式发电技术的新发展,较为系统完善地介绍了分布式电源的工作原理、数学模型、运行特性、综合利用及对电网稳定性的影响和防控措施等。全书共分9章,内容包括风力发电系统及稳定性、光伏发电及电压稳定性、微型燃气轮机及稳定性、储能技术及电压稳定性、电动汽车充放电及其稳定性、分布式发电及其稳定性、微电网及其稳定性、交直流混合微电网稳定性等。

本书可供从事电力系统规划设计、调度运行及控制管理的工程技术人员以及高等院校电气工程及相关专业的高年级本科生、研究生和教师参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

分布式发电并网与电压稳定性 / 赵兴勇等著. —北京: 中国电力出版社, 2015.3

ISBN 978-7-5123-7253-5

I. ①分… II. ①赵… III. ①发电-电压稳定-研究
IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 035815 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12 印张 262 千字

定价 49.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

现代电力系统是以“大电网、大机组、高电压”为主要特征的集中式供电系统，随着电网规模的不断扩大，新能源、新设备不断加入，使得电网的运行、监督和控制越来越困难，其不足也逐渐显现出来；另外，化石能源的逐渐枯竭及环境污染的压力，使得人们不得不寻找新的能源及供能方式。为了实现社会、环境、能源的可持续发展，除了对常规能源高效化、优质化利用之外，积极开发利用太阳能、风能等分布式发电是重要的途径之一。与传统的集中式发电相比，分布式发电具有投资少、损耗小、运行方式灵活、环保等优势，受到专家学者的广泛关注，得到快速发展。大多数国内外能源与电力专家认为，以新能源为主的分布式发电与大电网联合运行，是降低能耗、节省投资、提高电力系统可靠性与灵活性的主要方式，是 21 世纪电力工业的发展方向，符合我国智能电网发展的总体目标。

随着分布式电源大量接入电网，将给电网的电压稳定、电能质量、继电保护等带来一系列的问题。分布式电源的随机性、间隙性，使得并网系统的稳定性问题更加突出。尽管过去 10 多年来，含分布式电源电网稳定性的研究取得了较大的进展，但在提高分布式电源利用率、分布式电源参与需求侧响应、分布式电源的优化配置等方面仍有许多问题需要进行深入的研究。目前，尽管介绍分布式发电的书籍不少，但专门研究分布式发电稳定性的还比较少，这也是作者撰写本书的目的之一。

本书是作者在多年研究分布式发电及微电网的基础上编写而成的。本书共 9 章，赵兴勇教授负责第 1、4、5、6、7、8、9 章的撰写，王秀丽讲师负责第 2、3 章的撰写，全书由赵兴勇教授负责统稿。第 1 章介绍了电力系统电压稳定性研究现状、分布式发电并网对系统的影响及分布式发电的主要技术；第 2 章介绍了风力发电的现状、种类及原理，建立了含风电的电网模型及求解方法，研究了影响电压稳定的主要因素及防控措施；第 3 章介绍了光伏发电现状及光伏电网建模；第 4 章介绍了微型燃气轮机的工作原理，分析了其数学模型及运行特性，研究了并网燃气轮机的稳定性及存在的问题，并对其技术进行了展望；第 5 章介绍了主要储能技术及其特点，研究了复合储能的建模及其控制，并对复合储能的容量优化配置进行了分析；第 6 章介绍了电动汽车电池的动力特性、电

电动汽车与电网的互动构架、电动汽车对电网的影响，研究了电动汽车充放电控制策略；第 7 章介绍了分布式发电对电网的影响，研究了分布式发电的选址定容，分布式发电电源的优化配置及控制策略；第 8 章分析了微电网的定义、结构，微电网的主要控制方式，与大电网的协调控制，研究了微电网的需求侧响应；第 9 章介绍了交直流混合微电网的典型结构及特点，研究了其模型建立及其控制策略。

本书在编写过程中，得到很多的支持和帮助。张学军副教授、赵艳秋工程师参与了部分内容的讨论；研究生晋鹏娟、杨涛在绘图方面做了大量的工作，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

赵兴东

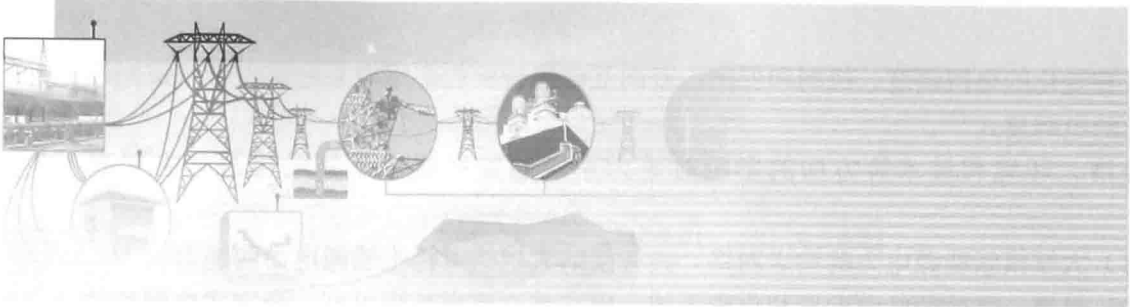
2015 年 1 月

目录

前言

第1章 概述	1
1.1 电力系统发展的回顾与展望	1
1.2 电力系统稳定性的定义及分类	2
1.3 电力系统电压稳定性研究综述	7
1.4 分布式发电并网研究现状及趋势	16
1.5 分布式发电并网主要技术	19
第2章 风力发电系统及稳定性	21
2.1 风力发电概述	21
2.2 风力发电系统的种类	25
2.3 风力发电机组的工作原理	27
2.4 风力发电场并网对电网电压作用机理	29
2.5 含风电的电网模型的建立及求解方法	36
2.6 影响风力发电系统电压稳定性的主要因素及防控措施	37
第3章 光伏发电及电压稳定性	49
3.1 光伏发电概述	49
3.2 含光伏发电系统电压稳定性研究现状及展望	51
3.3 并网光伏发电系统的技术特点和拓扑结构	52
3.4 并网光伏发电系统模型建立及求解方法	54
3.5 影响电压稳定性的主要因素及提高电压稳定性的措施	58
第4章 微型燃气轮机及稳定性	71
4.1 微型燃气轮机发电系统结构及工作原理	72
4.2 微型燃气轮机组的数学模型及运行特性	72
4.3 微型燃气轮机并网运行及控制策略	82
4.4 含微型燃气轮机电网电压稳定性分析	83
4.5 微型燃气轮机并网发电存在的主要问题及前景分析	87

第5章 储能技术及电压稳定性	89
5.1 储能技术概述	89
5.2 储能技术及特性	90
5.3 复合储能的可行性分析及应用前景	93
5.4 复合储能的结构、模型及控制	94
5.5 复合储能中各储能容量的优化配置	99
5.6 储能系统仿真分析	100
第6章 电动汽车充放电及其稳定性	103
6.1 电动汽车动力电池特性	103
6.2 电动汽车与电网的互动架构	106
6.3 影响充电站并网的主要因素	108
6.4 电动汽车充电对电网的影响	109
6.5 电动汽车智能充电控制策略	111
6.6 电动汽车充放电仿真分析	114
第7章 分布式发电及其稳定性	118
7.1 分布式发电概述	118
7.2 分布式发电对电力系统的影响	120
7.3 分布式发电的选址定容	124
7.4 分布式发电仿真分析	130
7.5 分布式发电优化配置方法	134
7.6 需求侧响应	137
第8章 微电网及其稳定性	141
8.1 微电网的定义及典型结构	141
8.2 微电网的模型层次	146
8.3 微电网的电压稳定性	146
8.4 微电网的需求侧响应	152
8.5 微电网运行方式的无缝切换	164
第9章 交直流混合微电网稳定性	171
9.1 交直流混合微电网稳定性研究现状及发展	171
9.2 交直流混合微电网建模	173
9.3 变换器的协调控制	174
9.4 交直流混合微电网仿真分析	178



概 述

1.1 电力系统发展的回顾与展望

电力系统包含发电、输电、变电、配电、用电和调度等环节。电力系统进入了智能电网时代。电力是重要的二次能源，它对国民经济的发展具有不可替代的作用，电力安全直接关系到国家经济的发展和社会的安定团结。

电能与其他能源不同，不能大规模储存，电能的生产、输送、分配、消费是同时进行的，即任何时刻发电设备产生的电能必须等于该时刻用电设备消耗和输送、分配中消耗的电能之和。这种平衡必须实时保持，否则，将会影响系统的安全稳定。20 世纪 90 年代以来，人类对化石能源短缺的预期，以及环境恶化的威胁，使得人们认识到，为了人类社会的可持续发展，必须大量节约化石能源，大幅度减少有害物的排放，因此，利用清洁能源和可再生能源的呼声日渐高涨，最终目的是以新能源和可再生能源逐步代替化石能源，保证能源的可持续供应，即所谓的新能源革命。

新能源革命以建设可持续发展的能源体系为目标。目前，世界上许多国家将发展新能源与可再生能源作为缓解能源供应矛盾、应对气候变化的重要措施。这种形势下，能源结构将发生重大变化，而可再生能源、化石能源的清洁利用绝大部分要通过转化为电能来实现，因此电网的重要性日益突出，电网将成为全社会重要的能源输送和配给网络，这对电网的安全性、适应性、资源优化配置能力提出了更高的要求。迎接能源革命的挑战，加快电网转型，发展新一代电网技术，成为当前电力系统发展的主要任务。

国内外电网及其技术发展的不同时期具有不同的技术经济特征，存在明显的代际差异、传承和发展特性。20 世纪前半期的电网属于第一代电网，以小机组、低电压、小电网为特征，交流输电占主导，是电网发展的兴起阶段；20 世纪后半期的电网属于第二代电网，以大机组、超高电压、互联电网为特征，超高压输电、直流输电并存，标志着电网进入规模化发展阶段；从 21 世纪初开始建设并预计到 2050 年后在世界范围内实现的第三代电网，以非化石能源发电占较大份额（如达到 40%~50%以上）和智能化为主要特征，大型骨干电源和分布式电源相结合；国家级主干输电网与地方电网、微电网协调

发展；智能化的电网调度、控制和保护；双向互动的智能化配用电系统是可持续发展和智能化的电网模式^[1]。

经济、环境和技术等方面的影响对电力系统的发展提出了新的挑战，主要表现在：

(1) 大规模新能源电力的输送网络，具有接纳大规模可再生能源电力的能力。

(2) 灵活、高效的能源配置和供应系统，建立客户需求响应机制，分布式电源和储能将改变终端用电模式，电能将在电网和客户之间双向流动，大幅度提高终端能源利用效率。

(3) 安全、可靠的智能能源网络，具有极高的供电可靠性，基本排除大面积停电的风险。

(4) 覆盖城乡的能源、电力、信息的物联网和综合服务体系，实现“多网合一”，成为能源、信息的双重载体。

随着我国经济的快速发展、能源供应的巨大变化及电力工业的迅速发展，一方面，为了满足电能大容量、远距离、低损耗输送的要求，适应未来能源流的变化，具备电网运行调度灵活性和电网结构的可扩展性，我国将建设以特高压交流为骨干网架，特高压、超高压、高压电网分层、分区，网架结构清晰的、强大的国家电网。另一方面，大力发展可再生能源和分布式能源，保证能源供应的可持续发展和充分提高新能源的利用效率。随着我国电网的发展，特别是华北—华中—华东同步电网的形成，我国电网将成为世界上电压等级最高、技术水平最高、规模最大的交直流混合电网。

坚强的智能电网是我国电网发展的方向，它是技术经济发展的必然结果，通过利用先进的技术提高电力系统在能源转换效率、电能利用率、供电质量和供电可靠性等方面的性能。

1.2 电力系统稳定性的定义及分类

近几十年来，世界各地发生了许多起由于电力系统失稳引起的大停电事故，这些事故造成了巨大的经济损失和社会影响，同时也反映出研究电力系统稳定性的重要意义。电力系统稳定性分析的基本问题是其定义和分类，对稳定性问题的分类反映了人们对电力系统本质认识的深化，准确理解不同类型的稳定性问题以及它们之间的相互关系，对于电力系统安全规划和运行是非常重要的。

1.2.1 国际权威机构电力系统稳定性的定义及分类

国际大电网会议(CIGRE)和国际电气与电子工程师学会电力工程分会(IEEE/PES)稳定定义联合工作组于2004年重新对电力系统稳定性进行了定义和分类^[2, 3]，电力系统稳定性是指系统在给定的初始运行方式下，受到物理扰动后仍能够重新获得运行平衡点，且在该平衡点大部分系统状态变量都未越限，从而保持系统完整性的能力。

IEEE/CIGRE 稳定定义联合工作组根据电力系统失稳的物理特性，受扰动的大小及研究稳定问题必须考虑的设备、过程和时间框架，将电力系统稳定分为功角稳定、电压

稳定和频率稳定三大类，如图 1-1 所示。



图 1-1 IEEE/CIGRE 电力系统稳定分类

1. 功角稳定

功角稳定是指互联系统中的同步发电机受到扰动后，保持同步运行的能力。功角失稳可能由同步转矩或阻尼转矩不足引起，其中，同步转矩不足引起非周期失稳，阻尼转矩不足将引起振荡失稳。

根据扰动的大小，将功角稳定分为小扰动功角稳定与大扰动功角稳定。

小扰动功角稳定是指系统遭受小扰动后保持同步运行的能力，它取决于系统的初始运行状态。由于扰动足够小，因此，在分析时，可在平衡点将描述系统的非线性方程线性化，在此基础上对稳定问题进行研究。小扰动功角稳定可表现为转子同步转矩不足引起的非周期失稳，以及阻尼转矩不足引起的转子增幅振荡失稳，小扰动失稳研究的时间范围通常是 10~20s。

大扰动功角稳定又称暂态功角稳定，是指电力系统遭受线路短路、切机等大扰动时，保持同步运行的能力，它由系统的初始运行状态和受扰动的严重程度共同决定。由于扰动足够大，因此，必须用非线性微分方程来研究。大扰动功角稳定表现为非周期失稳和振荡失稳两种模式。非周期失稳大扰动功角稳定问题，研究的时间范围通常是受扰后 3~5s，振荡失稳的研究时间范围通常是 10~20s。

小扰动功角稳定与大扰动功角稳定均是一种短期现象。

2. 电压稳定

电压稳定是指处于给定运行点的电力系统在经受扰动后，维持所有节点电压为可接受值的能力。它依赖于系统维持或恢复负荷需求和负荷供给之间平衡的能力。根据扰动的大小，IEEE/CIGRE 将电压稳定分为小扰动电压稳定和大扰动电压稳定。这符合一般的非线性系统和线性系统的稳定性定义。

小扰动电压稳定是指系统受到小的扰动后，如负荷的缓慢增长等，维持电压的能力。这类形式的稳定受某一给定时刻负荷特性、离散和连续控制影响。借助适当的假设，在给定运行点对系统动态方程进行线性化处理，从而可以用静态方法对小扰动电压稳定进行研究。从线性化计算可以得到有价值的灵敏度信息等，这些信息在确定影响系统稳定的主要因素时非常有用。

大扰动电压稳定是指系统受到大的扰动后,如系统故障、失去负荷、失去发电机等,维持电压的能力。这类形式的稳定取决于系统特性、负荷特性、离散和连续控制与保护及它们之间的相互作用。确定这种稳定形式需要在一个足够长的时间周期内,检验系统的动态行为,以便能够捕捉到诸如电动机、有载调压变压器、发电机励磁电流调节器等设备的运行及它们的相互作用。一般用包含合适模型的非线性时域仿真法来研究大扰动电压稳定问题。根据需要研究时间范围可从几秒到几十分钟。

电压稳定可能是短期的或长期的现象。短期电压稳定与快速响应的设备有关,必须考虑负荷的动态,及邻近负荷的短路故障,研究时间大约在几秒钟;长期电压稳定与慢动态设备有关,它通常由连锁的设备停运引起,与初始扰动程度无关,研究时间可以是几分钟或者更长的时间。

值得一提的是,IEEE/CIGRE 对于正确区分功角稳定和电压问题给出了明确的解释,功角稳定和电压稳定的区别并不是基于有功/功角和无功/电压幅值的弱耦合关系。实际上,对于重载情况下的电力系统,有功/功角和无功/电压幅值之间具有很强的耦合关系,功角稳定和电压稳定都受到扰动前有功、无功潮流的影响。

3. 频率稳定

频率稳定是指电力系统受到严重扰动后,发电和负荷需求出现大的不平衡,系统仍能保持稳定频率的能力。电力系统功率不平衡量是变化的,频率的变化是一个动态过程。频率稳定可以是短期的或长期的现象。

1.2.2 我国电力系统稳定性的定义及分类

我国 DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》规定,电力系统稳定性是指电力系统受到事故扰动后保持稳定运行的能力。根据动态过程的特征和参与动作的元件及控制系统,将电力系统稳定分为功角稳定、电压稳定和频率稳定三大类,如图 1-2 所示。

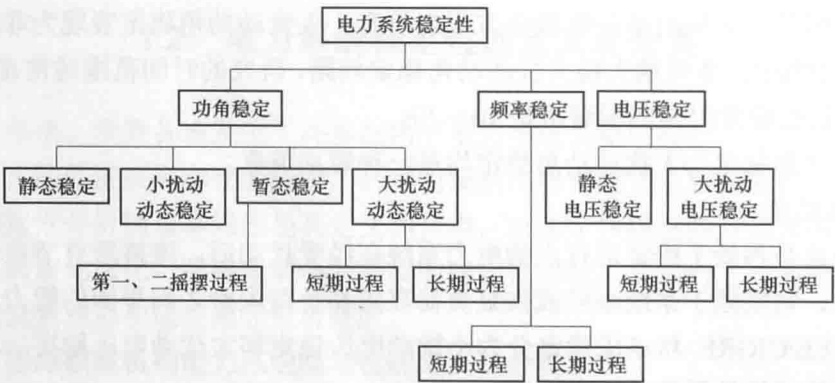


图 1-2 DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》电力系统稳定分类

1. 功角稳定

根据受扰动的大小以及导致功角不稳定的主导因素不同,功角稳定分为静态稳定、小扰动动态稳定、暂态稳定和大扰动动态稳定。

静态稳定是指系统受到小扰动后不发生周期性失稳,自动恢复到初始运行状态的能

力。它是由于同步力矩不足引起的,属于小扰动动态稳定的一种,主要用来定义系统正常运行和事故后运行方式下的静态稳定储备情况。

小扰动动态稳定是指系统受到小扰动后,不发生周期性振荡,保持较长过程稳定运行的能力。它是由阻尼力矩不足引起的,主要用于分析系统正常运行和事故后运行方式下的阻尼特性。

暂态稳定是指系统受到大扰动后,各同步机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳定运行方式的能力。它通常指第一、二摇摆不失去稳定性,主要用于确定系统暂态稳定极限和稳定措施。

大扰动动态稳定是指系统受到大扰动后,在系统动态元件和自动装置的作用下,保持系统稳定性的能力。它主要用于分析系统暂态稳定后的动态稳定性。

2. 电压稳定

电压稳定是指电力系统受到小的或大的扰动后,系统电压能够保持或恢复到允许的范围内,不发生电压崩溃的能力。根据受扰动程度的大小分为静态电压稳定和大扰动电压稳定。

静态电压稳定是指系统受到小扰动后,系统电压能够保持或者恢复到允许的范围内,不发生电压崩溃的能力。它主要用来定义系统正常运行和系统事故后运行方式下的电压静态稳定储备系数。

大扰动电压稳定是指电力系统受到大扰动后,系统不发生电压崩溃的能力,包括暂态电压稳定、动态电压稳定和中长期电压稳定。暂态电压稳定主要用于分析快速的电压稳定问题;中长期电压稳定主要用于分析在响应较慢的动态元件和控制装置作用下的电压稳定性。

3. 频率稳定

频率稳定是指系统受到严重扰动后,出现较大的有功功率不平衡,系统频率仍能够保持或恢复到允许的范围内,不发生频率崩溃的能力。它主要用于分析系统的旋转备用容量和低频减载负荷配置的有效性与合理性,以及机网协调控制等问题。

1.2.3 电力系统稳定性的定义及分类评述

IEEE/CIGRE 2004 年提出的电力系统稳定性定义和我国 DL 755—2001 中的有所不同。IEEE/CIGRE 和 DL 755—2001 均认为电力系统稳定是一个整体性问题,客观上只有稳定或不稳定状态,但依据系统的稳定特性、扰动大小和时间框架的不同,系统失稳可表现为多种不同的形式。为识别导致电力系统失稳的主要诱因,在分析特定问题时进行简化假设以及采用恰当的模型和计算方法,从而安排合理的方式,制定提高系统安全稳定水平的控制策略、规划和优化电网结构,IEEE/CIGRE 和 DL 755—2001 均将电力系统稳定分为功角稳定、频率稳定和电压稳定,这种分类对于分析和解决电力系统实际稳定问题十分必要,也有助于正确理解和有效处理电力系统稳定问题。表 1-1 给出了两种定义的比较与对应关系^[4]。

表 1-1

两种稳定定义与分类比较

比较项目	IEEE/CIGRE		DL 755—2001	
功角稳定	小扰动功角稳定	短期过程	静态稳定	
			小扰动动态稳定	
	大扰动功角稳定	短期过程	暂态稳定	第一、二摇摆过程
			大扰动动态稳定	短、长期过程
电压稳定	小扰动电压稳定	短、长期过程	静态电压稳定	
	大扰动电压稳定	短、长期过程	大扰动电压稳定	短、长期过程
频率稳定	短、长期过程		短、长期过程	

1. 功角稳定

IEEE/CIGRE 从数学计算方法和稳定预测的角度，将功角稳定分为小干扰功角稳定和大干扰功角稳定。在这种分类下，小干扰功角稳定认为扰动足够小，从而可采用基于线性化微分方程的小干扰稳定分析方法来研究，而大干扰功角稳定必须基于保留电力系统动态因素的非线性微分方程加以研究。小干扰功角稳定可通过特征根分析以预测和判断系统的稳定特性，而大干扰功角稳定可基于时域仿真预测和判断稳定性。

IEEE/CIGRE 认为，小干扰功角稳定研究的时间框架通常是扰动之后的 10~20s，第一摆失稳的大干扰功角稳定研究的时间框架通常是扰动之后的 3~5s，振荡失稳的大干扰功角稳定研究的时间框架通常延长到扰动之后 10~20s。因此，IEEE/CIGRE 将功角稳定（小干扰功角稳定和大干扰功角稳定）归为短期稳定问题。

IEEE 和 CIGRE 在早前各自给出的电力系统稳定的定义中曾将“动态稳定”作为功角稳定的一种稳定形式。但因为“动态稳定”在北美和欧洲分别表示不同的现象：在北美，动态稳定一般表示考虑控制（主要指发电机励磁控制）的小干扰稳定，以区别于不计发电机控制的经典“静态稳定”；而在欧洲却表示暂态稳定。为避免应用“动态稳定”这一术语造成的混乱，IEEE/CIGRE 在新的定义中不再采用“动态稳定”的术语表示。

DL 755—2001 从稳定物理特性和数学计算方法的角度，将功角稳定细分为静态稳定、小扰动动态稳定、暂态稳定和大扰动动态稳定。这种分类既考虑了失稳的不同原因，又兼顾了受到扰动的大小，从而可以采用不同的分析方法加以研究。

DL 755—2001 中，静态稳定的物理特性是指与同步力矩相关的小扰动动态稳定性，主要用于定义系统正常运行和事故后运行方式下的静稳定储备情况。小扰动动态稳定的物理特性是指与阻尼力矩相关的小扰动动态稳定性，主要用于分析系统正常运行和事故后运行方式下的阻尼特性。暂态稳定的物理特性是指与同步力矩相关的大扰动后第一、二摇摆的稳定性，用于确定系统暂态稳定极限和稳定措施。大扰动动态稳定的物理特性是指与阻尼力矩相关的大扰动动态稳定性，主要用于分析系统暂态稳定后的动态稳定性。

DL 755—2001 中，暂态稳定（同步转矩不足）和大扰动动态稳定（阻尼转矩不足）都是受到大扰动之后的功角稳定性，因此需采用基于微分方程的时域分析方法。

由上述分析可以看出，IEEE/CIGRE 依据扰动的大小，把功角稳定分为小干扰功角

稳定和大干扰功角稳定,而子类中不再具体细分是由哪种原因导致的稳定问题。DL 755—2001 同时考虑稳定物理特性和数学计算方法的不同,将功角稳定细分为静态稳定(在小扰动下由于同步力矩不足引起的小干扰功角稳定)、小干扰动态稳定(在小扰动下由于阻尼力矩不足引起的小干扰功角稳定)、暂态稳定(在大扰动下由于同步力矩不足引起的大干扰功角稳定)和大干扰动态稳定(在大扰动下由于同步阻尼力矩不足引起的大干扰功角稳定)。

2. 电压稳定

对于电压稳定,IEEE/CIGRE 从数学计算方法和稳定预测的角度,将电压稳定分为小干扰电压稳定和大干扰电压稳定。DL 755—2001 同样从数学计算方法和稳定预测的角度,将电压稳定分为静态电压稳定和大干扰电压稳定,该静态电压稳定与 IEEE/CIGRE 中的小干扰电压稳定是对应的。

对于大干扰电压稳定,IEEE/CIGRE 和 DL 755—2001 均认为既可以是由于快速动态负荷、HVDC 等引起的快速短期电压失稳,也可以是由慢动态设备如有载调压、恒温负荷和发电机励磁电流限制等引起的长过程电压失稳。

对于小干扰电压稳定(静态电压稳定),IEEE/CIGRE 认为在给定运行点,电力系统受到诸如持续负荷增加、连续控制、离散控制(有载调压使功率恢复)等可能导致电压失稳,这种小干扰电压失稳可以是一种短期现象,也可以是一种长期现象。

DL 755—2001 定义静态电压稳定的目的主要是用以考察电力系统正常运行和事故后运行方式下的电压静稳定储备情况,因此,未再从时间框架上将静态电压稳定加以区分。

3. 频率稳定

对于频率稳定,IEEE/CIGRE 和 DL 755—2001 均从系统论的角度定义频率在保持发电和负荷平衡情况下的稳定能力。此外,DL 755—2001 还从安全运行的角度定义频率必须保持或恢复到允许的范围內。

1.3 电力系统电压稳定性研究综述

电力系统电压稳定性的研究在电力系统稳定性研究中是发展较慢的一个分支。20 世纪 40 年代,苏联学者马尔柯维奇等首先注意到电压稳定问题,并提出了电压稳定判据,但到 20 世纪 70 年代末至 80 年代初此问题才开始作为一个专门的课题进行研究,其原因是当时世界上一些大的电网相继发生了以电压崩溃为特征的电网瓦解重大事故。20 世纪 90 年代前电压稳定研究主要集中在静态电压稳定方面,随着研究的深入,人们逐步认识到电压稳定问题的实质是一个动态问题,它与电力系统中许多元件的动态特性有密切的关系。

国家自然科学基金在新设立的重大研究计划《电力系统广域安全防御基础理论及关键技术研究》项目中,包含了有关电力系统电压稳定性的研究内容。与此同时,基于 GPS 和光纤通信的广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)及广域动态信息

监视分析保护控制 (Wide Area Monitoring Analysis Protection, WAMAP) 在电力系统中也逐步得到应用, 使在电网全局的高度开展电压稳定性的研究成为可能。

到目前为止, 电压稳定的研究虽然取得了一系列成果, 但与功角稳定相比, 对电压稳定的本质仍缺乏全面的认识, 理论和研究方法还不够完善和全面, 尤其是考虑分布式发电并网后, 诸如电压失稳的机理、电压稳定分析的数学模型和方法、电压稳定性指标以及电压稳定控制、电压稳定性与功角稳定性的关系等问题, 仍然有待于广大科技工作者进行深入细致的研究。

1.3.1 电压失稳场景及机理

1.3.1.1 电压失稳场景

这里给出了电力系统电压失稳的几种典型场景, 属于电力系统电压稳定问题的定性分析范畴, 这种分析有助于对电压失稳机理的理解。

1. 电压失稳分类

根据引起电力系统电压失稳主要原因的不同, 把电压失稳分为两种类型。

(1) 电压调控能力丧失型失稳。因系统无功储备 (包括发电机、同步调相机和 SVC 等动态无功补偿装置) 耗尽, 失去对电压的控制能力, 导致电压失稳。

(2) 阻塞型电压失稳。线路的无功损耗、变压器分接头调节限制和因电压降低导致电容器无功功率下降, 使需要无功支撑的区域得不到无功供应, 从而造成的电压稳定问题称为阻塞型电压失稳。发生这种电压失稳时, 系统无功储备可能还未耗尽。

2. 电压升高失稳

大多数电压失稳的表现形式为母线电压的持续下降, 但过电压导致失稳的情况也是存在的。引起这种类型电压失稳的原因包括电力网络的容性效应、发电机的最小励磁限制、同步调相机的进相运行、变压器分接头的调节限制及较低的负荷水平等。

3. 电压崩溃场景

在一个大型电力系统中, 当某个负荷节点失去电压稳定后, 由该节点从电网吸收的无功功率和电流的急剧上升必然导致整个电网电压水平的下降, 其中相邻负荷节点的电压下降尤为严重。在极端情况下导致这些节点也发生电压崩溃, 新的电压失稳负荷又把影响扩大到更大的范围, 结果往往会造成又一批负荷失去电压稳定, 使邻近的发电机因有功功率无法送出而加速, 在系统中引起剧烈的功角摇摆, 最后由于保护的相继动作而引起系统崩溃。这是电压失稳导致系统崩溃的基本过程。

1.3.1.2 电压失稳机理

电压稳定机理研究的主要目的是搞清楚电压崩溃发生、发展的物理本质, 影响电压稳定的关键因素, 电压稳定与功角稳定等其他电力系统稳定问题之间的相互关系等^[5, 6]。这些问题的研究对准确理解电压稳定的本质, 建立适当的电压稳定研究数学模型, 寻找合理的电压稳定安全指标, 设计有效的电压稳定预防校正控制措施等都有重要意义。

1. 电压失稳的静态机理解释

电压稳定最初被认为是一个静态问题, 可以用潮流代数方程来描述, 因而对失稳机

理的解释也是从静态的观点来进行的,认为平衡点的存在是系统稳定运行的前提。Venikov 等^[7]最早认识到潮流雅可比矩阵奇异与系统平衡点消失之间的关系,指出这种平衡点的消失可能是电力系统发生电压崩溃的根本原因,并提出以潮流雅可比矩阵奇异与否作为电压失稳的判据。Tainure 等^[8]也以潮流方程为基础对电压失稳机理进行了研究,他们发现,当系统运行条件紧张时,潮流方程的解会成对减少,最后剩下的一对解在临界点处重合,雅可比矩阵奇异。事实上,当考虑发电机及其调节系统和其他动态元件后,系统雅可比矩阵在临界点的奇异性会发生变化。由于系统的稳定性不仅要求系统存在潮流解并且应当是动态稳定的,因而仅以潮流方程雅可比矩阵的奇异来判断系统的稳定性所得结论往往偏于乐观。

2. 电压失稳的动态机理解释

随着对电压稳定问题研究的深入,考虑发电机及其控制系统的动态作用,负荷以及其他动态元件影响的动态失稳机理也应运而生。Lee 等^[9]认为发电机与网络(包括电压调节器和电压控制元件)的相互作用导致电压崩溃;当发电机励磁达到极限后,失去了电压和无功的控制作用,造成系统无功短缺和局部电压下降,可能触发电压不稳定事故,导致电压崩溃。同时发电机定子电流限制器也会恶化电压稳定性。文献[10, 11]从负荷稳定的角度出发,利用感应电动机导纳不能突变的性质,认为电压失稳可以归结为负荷为维持有功功率平衡而自动调节其导纳的特性和网络输送能力的有限性共同作用的结果。有载调压变压器(On-Load Tap Changer, OLTC)在低电压下的负调压作用或连续调节及静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC)达到其容量极限时,是电压失稳的主要原因之一^[12]。高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)的整流和逆变都要消耗大量的无功功率,特别是当逆变端处于短路容量小的负荷区域时,无功功率的快速恢复可能导致电压失稳和电压崩溃^[13]。文献[14]用能量函数法研究了电压稳定机理,认为势能阱的最低点是系统的稳定运行平衡点,势能阱壁由系统的不稳定平衡点构成,当扰动使系统运行点跃出势能阱壁时,系统就会发生电压失稳。文献[15]首先将分岔理论应用于电压稳定性分析,认为鞍结点分岔是导致系统电压失稳的主要原因,之后出现了许多利用分岔理论和中心流形理论分析电压稳定的文献。

1.3.2 电压稳定研究方法

1.3.2.1 静态电压稳定分析方法

1. 灵敏度方法

灵敏度方法将灵敏度系数定义为系统状态变量对控制变量的导数,比较常用的状态变量灵敏度有 dU_L/dP_L 、 dU_L/dQ_L 、 dU_L/dU_g 等,其中, U_L 、 P_L 、 Q_L 、 U_g 分别为负荷节点电压幅值、有功负荷、无功负荷、发电机节点电压幅值。当灵敏度系数变大时,系统趋向于不稳;如灵敏度系数趋于无穷大时,系统发生电压崩溃。对于不同的研究对象,可采用不同的状态变量,如需要监视电压,则可以采用电压灵敏度系数判据。在使用灵敏度法时,一般将控制变量取为负荷的变化量,电压崩溃点通常定义为负荷的极限点。灵敏度法常用来判断系统的电压稳定性、确定系统的薄弱母线及确定无功补偿装置的安

装位置等。

2. 潮流多解法

电力系统的潮流方程是一组二阶非线性方程，因而可能存在多个潮流解，对于一个 n 节点系统，系统的潮流最多可能有 2^{n-1} 个解，并且这些解都是成对出现的，其中一个为高电压解，是稳定解；另一个为低电压解，是不稳定解。随着系统负荷水平的加重，潮流方程解的个数成对减少，接近静态电压稳定极限时，只存在 2 个解，在到达稳定极限后，这 2 个潮流解融合成 1 个解。该方法将潮流方程解的存在性与静态电压稳定性联系起来，通过研究潮流方程解的情况判断系统的电压稳定性。

3. 最大功率法

最大功率法是将电力网络向负荷母线输送功率的极限运行状态作为静态电压稳定的极限运行状态，可以采用有功功率最大值或无功功率最大值作为判据。实际上，这类方法就是基于 $P-U$ 或 $Q-U$ 曲线定义电压稳定的方法，最大功率对应于曲线的顶点。

4. 奇异值分解（特征值分析）法

电压稳定临界点，从物理角度上是系统到达最大功率传输点，而从数学角度上就是系统潮流方程雅可比矩阵奇异的点。当系统的负荷接近其极限状态时，潮流雅可比矩阵接近奇异，因此，最小奇异值映射出雅可比矩阵奇异程度。可以把潮流雅可比矩阵的最小奇异值作为电压稳定的指标，用来反映当前工作状态接近临界工作状态的程

5. 方法评述

静态电压稳定主要评估电力系统在稳态时，尤其是在当前运行状态下的电压稳定情况。该类分析方法经历了较长时期的研究，取得了较满意的结果。灵敏度法是由于电压稳定性研究中最早的一类方法，与其他方法相比，其物理概念简单明确。在简单系统中，灵敏度判据是严格、准确的，但推广到复杂系统后，有效性无法保证。目前，经过改进的灵敏度方法在优化系统无功配置等方面还有一些应用。潮流多解法在电压稳定研究初期被以日本学者为主体的研究人员提出，潮流方程的多解性研究得出了很多有意义的结论，为计算电力系统的极限运行状态提供了一条途径，间接克服了潮流方程的雅可比矩阵在临界点奇异而带来的收敛问题，但低电压解的求取一直是一个比较困难的问题。潮流多解法在近年来的电压稳定研究中已经较少采用。特征值分析法和奇异值分析法关系密切，随着系统运行状态的变化，电压最容易失去稳定的模式可能改变，所以，在进行系统电压稳定性分析时，必须计算出一定数目的最小特征值及特征向量。实际上，潮流雅可比矩阵的奇异值或特征值变化较为缓慢，而且具有高度的非线性，发电机无功越限时会导致最小特征值跳变，因而，最小奇异值不是一种很好的电压稳定指标，难以用它对系统电压稳定程度作出客观评价。

上述几种方法是静态电压稳定分析中较多采用的方法，都是基于潮流方程或经过修改的潮流方程，在当前运行点处线性化后进行计算分析，本质上都是把电力网络的潮流极限作为电压静态稳定的临界点，而不同之处在于所采用的求取临界点的方法以及使用极限运行状态下的不同特征作为电压崩溃的判据。